

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM<sub>2.5</sub> 污染相互输送特征 ..... 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 ..... 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布预测与制图 ..... 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM<sub>2.5</sub> 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 ..... 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 ..... 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM<sub>2.5</sub> 碳组分季节变化特征 ..... 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM<sub>10</sub> 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 ..... 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 ..... 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM<sub>2.5</sub> 理化特征分析 ..... 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 ..... 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 ..... 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 ..... 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 ..... 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 ..... 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 ..... 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 ..... 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 ..... 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应:以太湖乌溪港为例 ..... 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 ..... 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 ..... 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 ..... 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 ..... 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 ..... 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 ..... 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 ..... 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 ..... 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 ..... 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 ..... 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 ..... 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 ..... 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 ..... 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨(FA)对氨氧化过程氨逃逸影响试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 ..... 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 ..... 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 ..... 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌(Nitrospira)的富集及其动力学参数 ..... 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 ..... 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 ..... 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 ..... 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO<sub>2</sub> 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 ..... 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 ..... 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 ..... 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 ..... 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 ..... 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 ..... 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 ..... 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 ..... 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 ..... 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 ..... 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O<sub>3</sub> 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 ..... 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 ..... 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量特征及其影响因素 ..... 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 排放研究进展 ..... 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 ..... (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

# 低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化

李冬<sup>1</sup>, 曹瑞华<sup>1</sup>, 杨航<sup>2</sup>, 王刘煜<sup>1</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>, 曾辉平<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为实现低温(5~6℃)高铁锰氨氮[TFe 9.0~12.0 mg·L<sup>-1</sup>、Fe(Ⅱ) 6.5~8.0 mg·L<sup>-1</sup>、Mn(Ⅱ) 1.9~2.1 mg·L<sup>-1</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 1.4~1.7 mg·L<sup>-1</sup>]地下水生物同池净化, 以中试模拟滤柱在某水厂进行了实验研究. 结果表明, 出水总铁在启动之初即能合格, 出水氨氮和锰分别在 72 d 和 75 d 实现净化. 工艺启动周期受培养温度和原水水质影响较大. 滤速越大, 锰的极限去除量越低, 滤速≥1.0 m·h<sup>-1</sup>时, 锰的极限去除量为 3.0 mg·L<sup>-1</sup>. 锰是滤速提升的限制因素, 工艺极限滤速是 4.5 m·h<sup>-1</sup>. 滤速≤6.0 m·h<sup>-1</sup>时, 氨氮的极限去除量为 1.5 mg·L<sup>-1</sup>, 且不受滤速影响, 溶解氧(dissolved oxygen, DO)不足导致工艺对更高浓度氨氮净化失败. DO 充足的条件下, 工艺净化所需滤层厚度随锰和氨氮浓度增加而增厚. 滤速增大会导致铁锰氨氮氧化去除区间向滤层深处位移, 发生“锰”溶出现象. 进一步分析表明, 铁和氨氮在滤层内可同步氧化去除; 锰的高效氧化去除区间与铁和氨氮的高效氧化去除区间存在明显分级.

**关键词:** 低温; 高铁锰氨氮; 地下水; 同池净化; 启动; 氧化去除区间; 滤速; 滤层厚度

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5097-09 DOI: 10.13227/j.hjx.201705096

## Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter

LI Dong<sup>1</sup>, CAO Rui-hua<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>2</sup>, WANG Liu-yu<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, ZENG Hui-ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A pilot-scale bio-filter was constructed for the removal of high concentrations of iron (TFe 9.0-12.0 mg·L<sup>-1</sup>, Fe(Ⅱ) 6.5-8.0 mg·L<sup>-1</sup>), manganese (1.9-2.1 mg·L<sup>-1</sup>), and ammonia nitrogen (1.4-1.7 mg·L<sup>-1</sup>) simultaneously from low temperature (5-6℃) groundwater in a plant. The results showed that iron was removed at the beginning of the bio-filter start-up, and manganese and ammonia nitrogen were removed on day 72 and day 75, respectively. The start-up period was influenced by the culture temperature and the raw water quality. For higher filtration rates, the removal of manganese was lower. When the filtration rate was more than 1.0 m·h<sup>-1</sup>, the maximum removal of manganese was about 3.0 mg·L<sup>-1</sup>. Manganese was the limiting factor for the increase of filtration rate, and the maximum filtration rate of the single bio-filter was 4.5 m·h<sup>-1</sup>. When the filtration rate was less than 6.0 m·h<sup>-1</sup>, the removal of ammonia nitrogen was about 1.5 mg·L<sup>-1</sup>, which was not affected by the filtration rate. Dissolved oxygen (DO) deficiency led to failure with the removal of more ammonia nitrogen. The required thickness of the bio-filter required for purification increased as the concentration of manganese and ammonia nitrogen increased when DO was sufficient. The removed iron, manganese, and ammonia nitrogen move to the depth of the filter layer, and there will be “manganese dissolution” when the filtration rate is increased. Iron and ammonia nitrogen in the filter layer can be oxidized and removed simultaneously. Manganese is oxidized and removed after the iron and ammonia nitrogen. The effective oxidation and removal section of manganese, iron, and ammonia nitrogen are obviously graded.

**Key words:** low temperature; high concentration of iron, manganese and ammonia nitrogen; groundwater; single bio-filter; start-up; oxidation and removal section; filtration rate; thickness of filter layer

生物除铁除锰工艺因其可实现铁锰及氨氮生物净化、流程简单、无需化学试剂投加、绿色环保、投资和运行费用低廉等优点<sup>[1~4]</sup>, 得到了世界多国工程技术人员认可, 中国<sup>[5,6]</sup>、美国<sup>[7]</sup>、德国<sup>[8]</sup>、荷兰<sup>[9]</sup>、加拿大<sup>[10]</sup>、希腊<sup>[11]</sup>等国家已有生物除铁除锰滤池应用于工程实践. 当前国外生物除铁除锰工程应用处理的铁锰和氨氮复合污染地下水原水水温多在 10℃ 以上, 虽然我国已经能实现 8~9℃ 地下水生物除铁除锰除氨氮, 但是处理的原水锰和氨氮

浓度普遍在 1.2 mg·L<sup>-1</sup> 以下<sup>[6,12]</sup>, 针对我国海拉尔、佳木斯等地区, 更低温度(5~6℃)的高铁锰氨氮[TFe 9.0~12.0 mg·L<sup>-1</sup>、Fe(Ⅱ) 6.5~8.0 mg·L<sup>-1</sup>、Mn(Ⅱ) 1.9~2.1 mg·L<sup>-1</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 1.4~1.7 mg·L<sup>-1</sup>]复合污染地下水生物净化尚未研究和

收稿日期: 2017-05-10; 修订日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678006)

作者简介: 李冬(1976~), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

实现. 目前, 这些地区采用传统的化学接触氧化除铁除锰工艺已经无法实现出厂水锰和氨氮达标.

有研究表明<sup>[13,14]</sup>, 温度会显著影响生物酶的催化氧化速率和基质传递到细胞的速率. 温度越低, 滤池挂膜周期越长<sup>[15,16]</sup>, 锰氧化菌(MnOB)氧化除锰活性越差<sup>[4,17]</sup>、硝化菌硝化去除氨氮的能力越弱<sup>[15,18]</sup>. 为实现低温(5~6℃)高铁锰氨氮[TFe 9.0~12.0 mg·L<sup>-1</sup>、Fe(II) 6.5~8.0 mg·L<sup>-1</sup>, Mn(II) 1.9~2.1 mg·L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 1.4~1.7 mg·L<sup>-1</sup>]地下水生物同池净化, 笔者在佳木斯某水厂进行了中试实验, 探究了该水质条件下滤池启动和净化规律, 优化滤层厚度和运行滤速, 以期为实际生产提供基础依据和参考.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验装置

实验装置如图1所示. 采用有机玻璃滤柱模拟生产滤池, 并在外层覆盖保温材料, 滤柱内径250 mm, 高3 000 mm. 采用双层滤料, 装填总高度1 600 mm, 上层400 mm为无烟煤成熟滤料, 级配1.0~1.2 mm, 下层1 200 mm为锰砂滤料, 级配0.6~1.2 mm. 承托层采用鹅卵石, 级配1.2~20.0 mm, 厚度250 mm.

### 1.2 实验水质

根据实验目的与方法, 实验前期用蠕动泵向滤池出水中加入适量硫酸锰(MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O)和硫酸铵[(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]配置成反应器进水, 实验后期采用水厂原水. 实验主要水质指标如下: TFe 9.0~12.0 mg·L<sup>-1</sup>、Fe(II) 6.5~8.0 mg·L<sup>-1</sup>, Mn(II) 0.7~3.6 mg·L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 0.5~2.2 mg·L<sup>-1</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N < 0.6 mg·L<sup>-1</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N痕量, 高锰酸盐指数 < 1.8 mg·L<sup>-1</sup>, pH 6~7, 水温 5~6℃, DO 9.2~9.4 mg·L<sup>-1</sup>.

### 1.3 实验方法

在1.0 m·h<sup>-1</sup>条件下启动滤柱, 并根据出水情况, 逐步提高进水铁锰和氨氮浓度, 启动期间, 当滤速下降且无法调节时对滤柱进行反冲洗, 反冲洗强度7~8 L·(s·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, 反冲洗历时3~4 min, 当在低温(5~6℃)高铁锰氨氮[TFe 9.0~12.0 mg·L<sup>-1</sup>、Fe(II) 6.5~8.0 mg·L<sup>-1</sup>, Mn(II) 1.9~2.1 mg·L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 1.4~1.7 mg·L<sup>-1</sup>]条件下, 出水达标并稳定超过7 d后, 即视为模拟滤柱启动成功<sup>[16,19,20]</sup>. 启动成功后, 逐步提高滤柱运行滤速, 探究铁锰氨同池净化极限滤速, 在此期间, 滤池反冲洗强度10~12 L·(s·m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, 反冲洗历时4~5

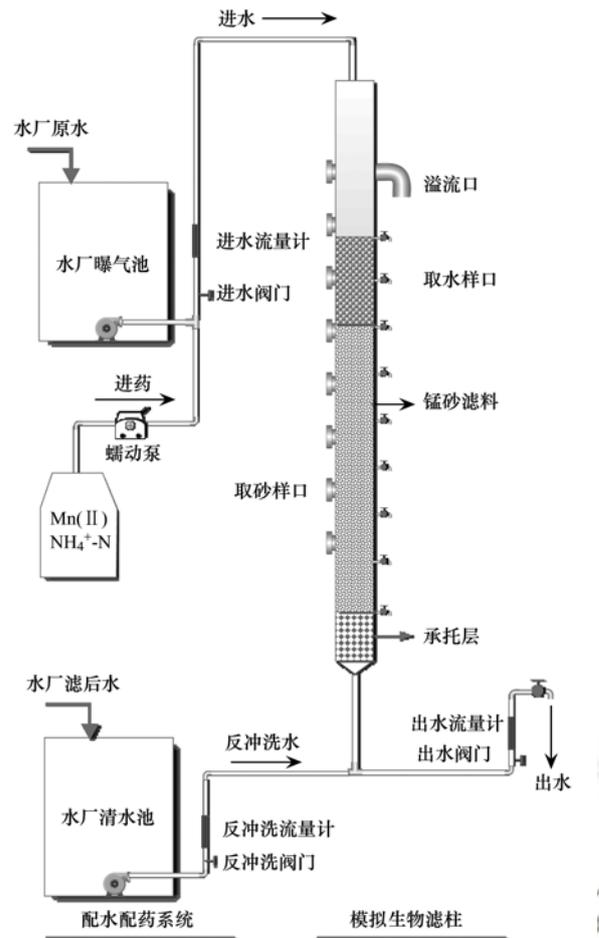


图1 反应器装置示意

Fig. 1 Experimental equipment in the reactor

min, 反冲洗周期24~48 h. 实验期间, 通过沿程分析, 明晰铁锰和氨氮氧化去除区间, 优化滤速和滤层厚度.

### 1.4 检测项目及方法

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 纳氏试剂比色法; TFe和Fe(II): 二氮杂菲分光光度法; Mn(II): 过硫酸铵分光光度法; 化学需氧量: 高锰酸盐指数(酸法); NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 紫外分光光度法; DO、pH、T: 便携式测定仪(Qxi 315i-WTW).

## 2 结果与讨论

### 2.1 低温高铁锰氨氮生物净化滤柱启动

滤柱启动过程中, 铁、锰和氨氮的去除情况如图2所示. 由于铁在模拟滤柱中去除以化学接触氧化为主<sup>[21,22]</sup>, 所以, 滤柱自启动之初, 去除率就高达98%以上, 似乎未受到低温的影响. 在整个启动过程中, 出水总铁始终合格. 但是, 滤料刚装入滤柱时, 由于滤层结构尚不稳定, 对污染物的截留性能稍差, 因此, 启动初期对铁的去 除效果低于实验

后期. 由于铁的氧化还原电位 (oxidation-reduction potential, ORP) 低于锰和氨氮<sup>[2]</sup>, 并且铁以化学氧化去除为主<sup>[21,22]</sup>, 而锰和氨氮的去除是以生物氧化

为主<sup>[4,12]</sup>, 所以启动过程中, 铁的氧化去除未受到进水锰和氨氮浓度变化的影响, 出水始终合格, 如图 2(a) 所示.

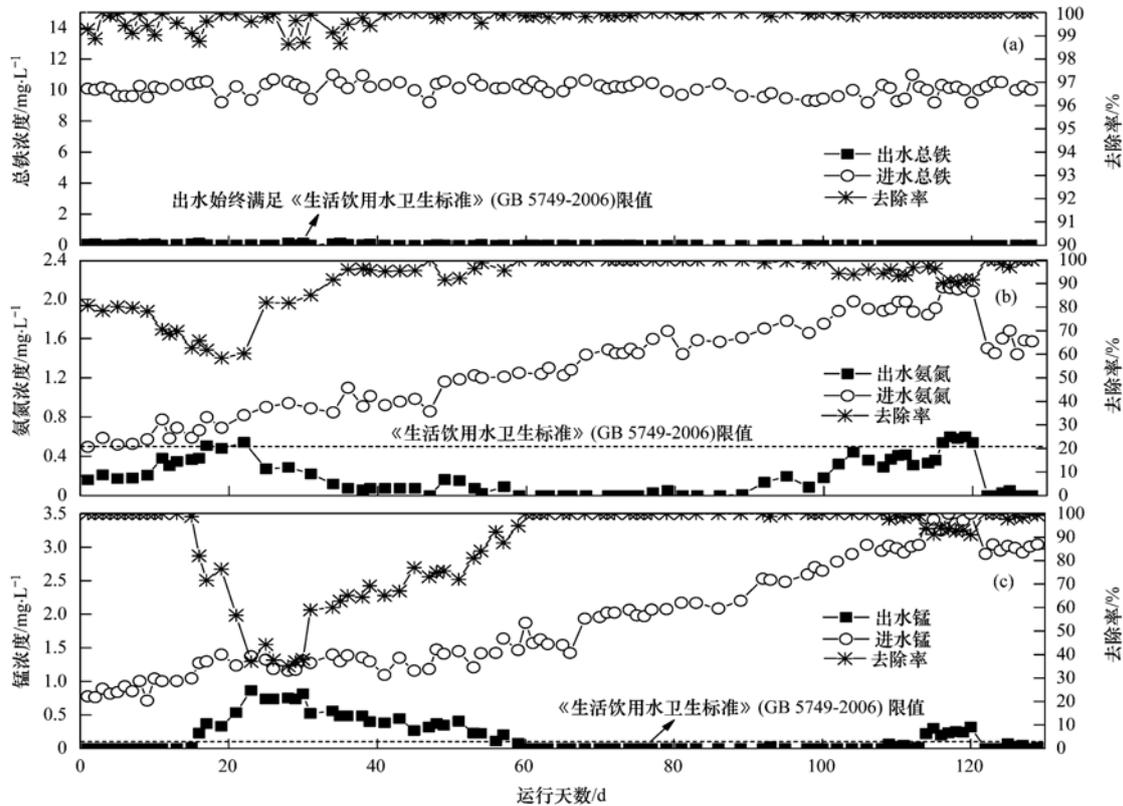


图 2 启动过程进出水铁锰和氨氮浓度变化

Fig. 2 Variation of iron, manganese, and ammonia nitrogen concentration during start up

由于滤料具有物理吸附作用, 所以图 2(b) 中, 滤柱启动之初便对氨氮具有良好的去除效果<sup>[23]</sup>, 但是, 由于滤料的吸附位有限<sup>[4,23]</sup>, 因此, 滤柱对氨氮的去除率仅有 80% 左右. 随着培养周期延长, 滤料吸附性能趋于饱和, 在此期间, 因为生物硝化去除氨氮的过程尚未培养成熟, 所以滤柱对氨氮的去除率会不断下降, 个别天数出水不能合格, 当滤柱运行至 19 d 时, 氨氮的去除率降至最低. 此后, 生物硝化逐渐成熟, 代替物理吸附成为氨氮去除主要路径<sup>[24,25]</sup>, 所以, 自 20 d 起, 滤柱对氨氮的去除效果开始好转, 当滤柱运行至 72 d 时, 在低温 (5 ~ 6℃) 条件下成功实现了 1.5 mg·L<sup>-1</sup> 水平氨氮的去除, 去除率达到 100%. 此后 46 d 内, 滤柱出水氨氮始终合格, 生物滤层硝化能力培养成熟<sup>[4,5,12]</sup>. 但是, 由图 2(b) 可知, 随着进水氨氮浓度不断增加, 自 98 d 起, 氨氮去除率出现下降, 出水氨氮浓度随进水氨氮浓度增加而增加, 分析认为, 由于此时出水 DO 仅有 0.2 ~ 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 剩余, DO 不足导致硝化菌氧化氨氮缺乏必要的电子受体而使氨氮的

去除效果下降<sup>[4,5]</sup>. 自 121 d 起, 当降低进水氨氮浓度至 1.5 mg·L<sup>-1</sup> 左右时, 氨氮去除率迅速恢复至 100%, 这进一步说明进水氨氮浓度过高、DO 不足导致生物滤柱对氨氮去除效果恶化.

同样因为滤料的物理吸附作用<sup>[4,23]</sup>, 启动之初, 滤柱对锰的去除率高达 100%, 如图 2(c) 所示, 吸附去除似乎未受到低温影响. 但是, 当滤柱运行至 16 d 时, 滤料对锰的吸附量减少, 出水锰开始超标, 并在此后一段时间内, 吸附逐渐达到饱和, 出水水质持续恶化. 在滤料吸附达到饱和的过程中, 滤料表面 MnOB 不断富集, 生物氧化固锰除锰效能逐渐发挥, 滤柱运行至 28 d 时, 锰的去除率降至了最低, 此后反转升高, 滤柱运行至 60 d 时, 锰去除率再次达到了 100%. 当滤柱运行至 75 d 时, 在低温 (5 ~ 6℃) 高铁高氨氮条件下成功实现了高锰 (1.9 ~ 2.1 mg·L<sup>-1</sup>) 地下水净化, 并且当进水 Mn < 3.1 mg·L<sup>-1</sup> 时, 出水锰连续 46 d 都能合格, 生物滤层固锰除锰能力培养成熟, 抗冲击负荷能力较强, MnOB 进入了第二活性增殖期<sup>[5,16]</sup>. 但是当进

水  $Mn > 3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水锰超标, 分析认为, 由于此时进水铁锰氨浓度较高, 铁锰氨氧化去除导致滤柱内氧分压降低, 锰氧化菌对低浓度 DO 网捕能力较差<sup>[12]</sup>, 因缺乏足够的电子受体, 所以无法完成对剩余锰的氧化去除, 滤层对锰的净化达到极限.

## 2.2 低温高铁锰氨氮生物净化极限滤速

据 2.1 节分析知, 虽然生物滤池可实现低温高铁锰氨氮地下水净化, 但是运行滤速仅有  $1.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ . 为提高低温高铁锰氨氮地下水生物净化效率, 对工艺极限滤速进行了探求. 由图 3 可知, 滤柱对铁的氧化去除不受运行滤速变化影响, 即使滤速提升至  $6.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 出水也未出现波动, 在该水质条件下, 铁不是运行滤速提升的限制因素, 这说明铁的接触氧化速率很快, 在空床接触时间 (empty bed contact time, EBCT, 滤层厚度/运行滤

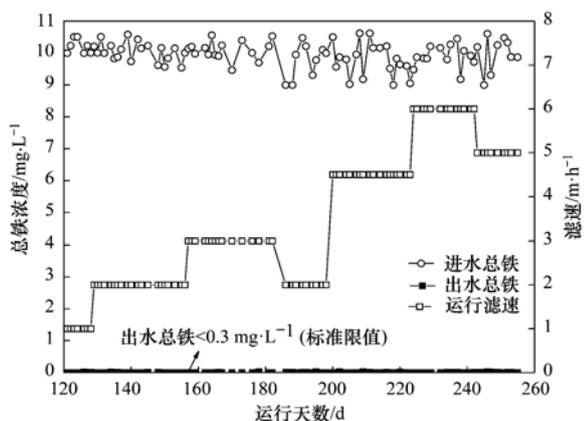


图 3 滤速优化过程进出水铁浓度变化

Fig. 3 Variation of iron concentration with filtration rate increases

表 1 不同滤速和 EBCT 条件下氨氮去除量

Table 1 Removal of ammonia nitrogen at different filtration rates and EBCT

阶段/d	滤速 $/\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	EBCT $/\text{min}$	氨氮负荷 $/\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	氨氮平均去除量 <sup>1)</sup> $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	稳定运行天数 $/\text{d}$
121 ~ 129	1.0	96.00	1.54	1.53	9
130 ~ 156	2.0	48.00	3.12	1.51	14
185 ~ 197	2.0	48.00	3.16	1.58	12
157 ~ 184	3.0	32.00	4.89	1.55	16
198 ~ 224	4.5	21.33	6.93	1.52	8
225 ~ 242	5.0	19.20	7.70	1.48	13
243 ~ 255	6.0	16.00	9.30	1.43	10

1) 为滤柱在该滤速条件下运行稳定后得出的平均值

图 5 中, 当滤速由  $1.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  增加至  $2.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 由于滤料表面的水流剪切力增大, 致使 MnOB 固锰除锰量减少, 出水锰严重超标. 经过一段时间的驯化培养后, MnOB 对锰的网捕能力增强, 锰的去除量有所增加, 但是仍然不能恢复至  $1.0 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  时的去除水平. 分析认为, 锰在生物滤

速) 大于 16 min 时, 受空床接触时间 EBCT 影响较小<sup>[4]</sup>.

图 4 中, 滤柱运行的不同时期, 当滤速由低一级向高一级变化时, 出水氨氮会出现短暂升高, 氨氮平均去除量会暂时性降低, 这可能是因为滤速增大, 导致滤料表面的水流剪切力增大, 部分硝化菌脱落、生物量不足<sup>[26,27]</sup>或氨氮负荷增大, 生物量不足所致, 亦有可能是由于滤速增大, EBCT 减少, 硝化反应时间缩短所致. 但是, 当滤柱在高一级的滤速条件下培养一段时间后, 氨氮的平均去除量会升高, 这说明, 出水氨氮随滤速提升而短暂升高与硝化反应时间缩短无关, 主要受生物量不足的影响. 当滤柱在高滤速条件下运行一段时间后, 老化的硝化菌脱落, 耐滤速冲击强的硝化菌得到富集, 生物量达到新的动态平衡<sup>[26,27]</sup>, 并且在高氨氮负荷条件下, 中下部滤层充分成熟、滤料表面披覆的生物量增加, 受水流剪切力的影响减少, 所以对氨氮的去除量又会增加.

不同滤速和 EBCT 条件下, 滤柱运行稳定后, 氨氮的平均去除量差别较小, 如表 1 所示, 这进一步说明, 在 DO 充足、EBCT > 16 min 的条件下, 生物滤柱培养成熟后, 氨氮的去除量受 EBCT 影响较小. 综合以上分析, 滤速提升会导致出水氨氮升高, 但是出水始终符合《生活饮用水卫生标准》. 随着培养周期延长, 滤层内硝化菌的数量增大并达到新的平衡后, 氨氮的去除效果能够恢复至滤速提升前水平, 氨氮亦不是同池净化滤速提升的限制因素.

层内的氧化去除遵循零级反应规律<sup>[28,29]</sup>, 当生物滤柱在各个滤速梯度条件下运行稳定后, 生物总量处于动态平衡, 此时模拟滤柱对锰的氧化去除量与进水锰浓度无关, 出水锰是时间  $t$  的减函数, 滤速增大, EBCT 减小, 锰的去除量随之减少, 因此无法恢复至滤速增加前的水平. 同样, 当滤速由  $2.0$

$\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加至  $3.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,也表现出与之相同的变化规律.基于锰的去除所遵循的零级反应规律理论,当运行滤速由  $3.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 回降至  $2.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,

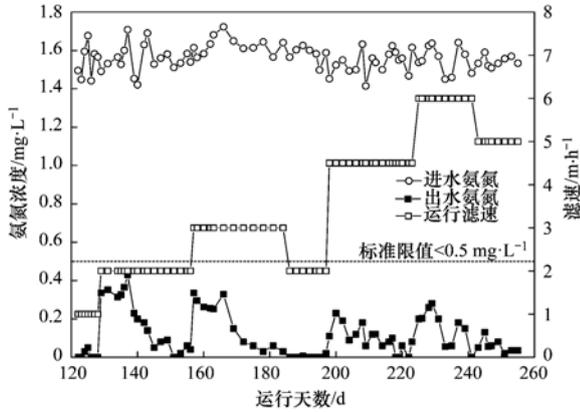


图4 滤速优化过程进出水氨氮浓度变化

Fig. 4 Variation of ammonia nitrogen concentration with filtration rate increases

滤柱对锰的去存量会随着 EBCT 增大而增大.不同滤速运行阶段,当滤柱运行稳定后,锰的平均去除量如表 2 所示.

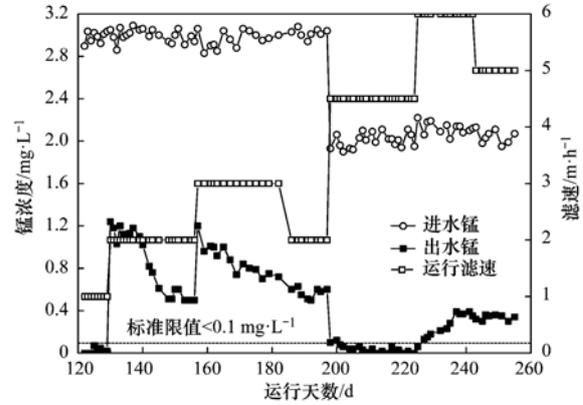


图5 滤速优化过程进出水锰浓度变化

Fig. 5 Variation of manganese concentration with filtration rate increases

表2 不同滤速和 EBCT 条件下锰去除量<sup>1)</sup>

Table 2 Removal of ammonia nitrogen at different filtration rates and EBCT

阶段/d	滤速 $/\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$	EBCT $/\text{min}$	锰负荷 $/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	氨氮负荷 $/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	进水锰平均浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	锰平均去除量 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	稳定运行 天数/d
121 ~ 129	1.0	96.00	2.98	1.54	2.98	2.96	9
130 ~ 156	2.0	48.00	5.94	3.10	2.97	2.43	12
157 ~ 184	3.0	48.00	9.00	4.86	3.00	2.24	14
185 ~ 197	2.0	32.00	6.04	3.16	3.02	2.45	12
198 ~ 224	4.5	21.33	9.14	6.98	2.03	2.01	11
225 ~ 242	6.0	19.20	12.60	9.24	2.10	1.74	8
243 ~ 255	5.0	16.00	10.20	7.70	2.03	1.69	12

1) 进水锰平均浓度和锰平均去除量均为滤柱在该滤速条件下运行稳定后得出的平均值

本实验自 198 d 起,恢复水厂原水运行,如图 5 所示,当运行滤速提升至  $4.5\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,出水锰能稳定合格.但是当滤速提升至  $6.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 后,锰的去除效果变差,出水不合格,出现“漏锰”现象,这符合锰去除所遵循的零级反应<sup>[28,29]</sup>规律.滤柱在  $6.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 滤速条件下运行稳定后,锰的平均去除量下降至  $1.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,且连续 8 d 稳定,说明此时 MnOB 已经进入了第二活性增殖期<sup>[5,16]</sup>.然而,调低滤速至  $5.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 后,锰的去除量反而随 EBCT 增加而略有减少,似乎违背了锰去除所遵循的零级反应<sup>[28,29]</sup>规律.有分析认为,可能是因为在高氨氮负荷条件下,大量氨氮进入滤层锰氧化去除区间, MnOB 活性受到抑制所致<sup>[30,31]</sup>,而在  $5.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下锰的去除量略低于  $6.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的锰去除量,可能是因为氨氮对锰的抑制作用具有滞后性和累积效应,短时间内少量 MnOB 活性受到抑制对锰的氧化去除影响并不显著.在  $5.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下,经过

连续 13 d 的驯化培养,滤柱对锰的去除率达到稳定,约为进水的 83%,此时 MnOB 再次进入了第二活性增殖期<sup>[5,16]</sup>.由此分析,低温高铁锰氨氮( $5\sim 6^\circ\text{C}$ , TFe  $9.0\sim 12.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Fe(II)  $6.5\sim 8.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Mn(II)  $1.9\sim 2.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$   $1.4\sim 1.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )地下水同池净化的极限滤速是  $4.5\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ，“漏锰”导致滤速继续提升失败.

根据课题组前期研究成果,当水体温度为  $3\sim 4^\circ\text{C}$ ,原水锰和氨氮浓度分别为  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $1.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生物滤柱实现  $3.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 稳定运行需要长达 240 d 的培养期<sup>[4]</sup>;当水体温度为  $5\sim 6^\circ\text{C}$ ,原水锰为  $0.8\sim 1.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮痕量时,生物滤柱实现  $6.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 稳定运行仅需要 120 d 的培养期<sup>[16]</sup>.本实验中,水体温度为  $5\sim 6^\circ\text{C}$ ,原水锰为  $1.9\sim 2.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮为  $1.4\sim 1.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,在相同的实验方法下,生物滤柱实现  $4.5\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 稳定运行需长达 205 d.由此对比,生物同池净化铁锰

氨复合污染低温地下水，培养周期受环境温度和原水水质双重影响。

### 2.3 生物除铁锰、氨氮滤层厚度探求

#### 2.3.1 不同水质对滤层厚度的需求

由于铁、锰和氨氮的 ORP 值不同，铁 (< 200 mV) < 氨氮 (200 ~ 400 mV) < 锰 (> 400 mV)<sup>[21]</sup>，所以，理论上铁、锰、氨氮的去除先后顺序是铁、氨氮、锰。但是，铁、锰和氨氮在滤柱中的氧化去除顺序只是相对而言的，由于铁的去是化学接触氧化过程<sup>[21,22]</sup>，氨氮的去是硝化反应过程<sup>[24,25]</sup>，在 DO 充足的条件下，两者可同时在滤层相同区间去除，所以，图 6 中，铁的氧化去除高效区间在滤层 0 ~ 30 cm 段，至滤层 80 cm 处降低至零，不受进水铁锰及氨氮浓度变化的影响。由于滤层中上部氧分压

较高，所以氨氮的高效氧化去除区间也集中在滤层 0 ~ 30 cm 段。由于 Mn(II) 系与 Fe(II) 系的标准氧化还原电位差大于 0.4 V，因此，只有当原水中的 Fe(II) 充分氧化为 Fe(III) 后，Mn(II) 才能被有效氧化为 Mn(IV) 氧化物，实现去除<sup>[32]</sup>，所以，铁的氧化去除区间内锰几乎没有去除，两者的高效氧化去除区间存在显著分级。在整个滤层内，锰的净化去除相对滞后。锰在滤层 0 ~ 50 cm 区间内去除量很少，自滤层 50 cm 处开始，去除量和去除速率才明显增大。如图 6 所示，进水氨氮和锰浓度越高，净化所需滤层越厚。但是，当进水铁锰和氨氮氧化去除理论需氧量大于等于实际进水 DO 时，低温高铁锰氨氮地下水的净化与滤柱中的生物量无关，也即与滤层厚度无关。

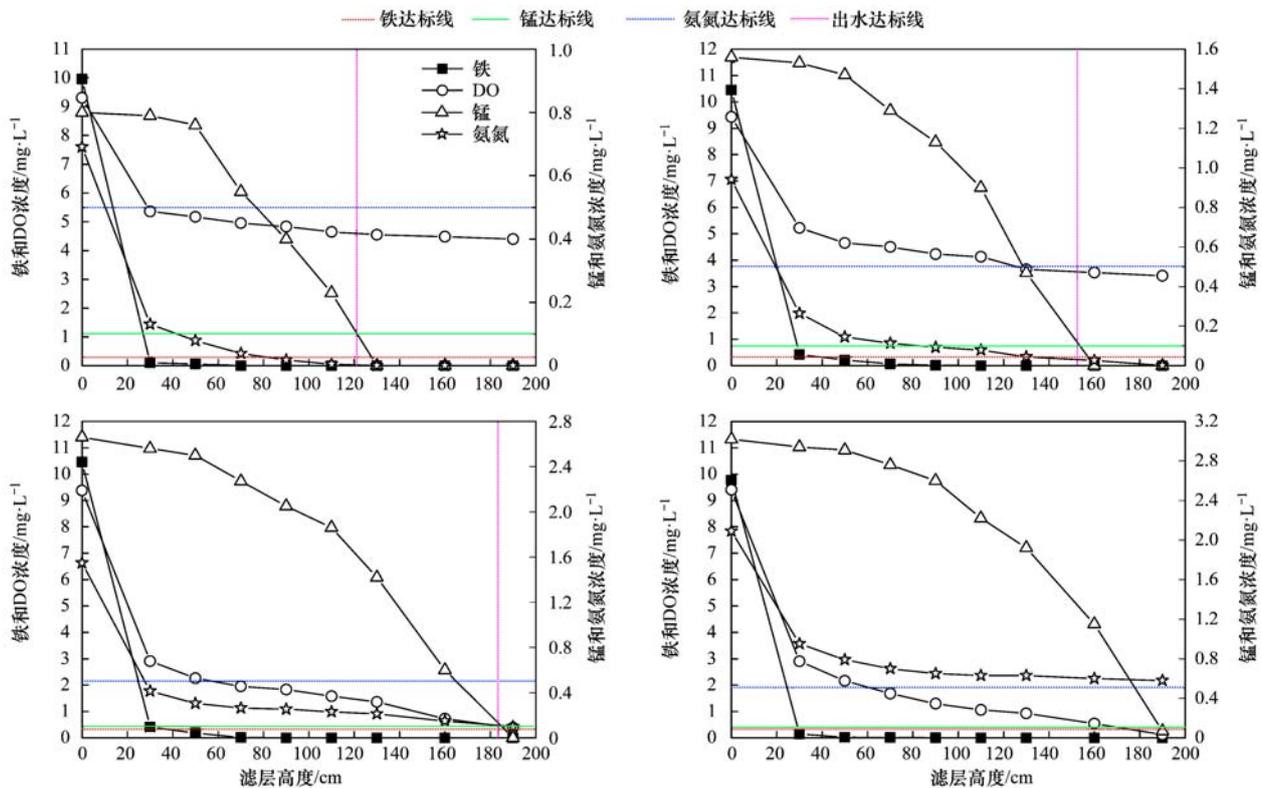


图 6 不同浓度锰和氨氮沿程去除情况

Fig. 6 Variation of manganese and ammonia nitrogen with different concentrations in the filter column

#### 2.3.2 不同滤速对滤层厚度的需求

铁在生物除铁除锰滤池中的去除遵循一级化学氧化动力学规律<sup>[28,33]</sup>，理论上接触氧化时间越长，铁的去率越高。所以，图 7 中，当滤速由 2.0 m·h<sup>-1</sup> (EBCT = 48 min) 变为 6.0 m·h<sup>-1</sup> (EBCT = 16 min) 时，铁去除所需要的滤层厚度由 50 cm 增加至 90 cm。由 2.3.1 节分析知，Fe(II) 可以还原滤料表面被生物氧化固着的 Mn(IV) 氧化物，所以随着铁氧化去除区间向滤层深处延伸，导致上部滤层内，有锰

“溶出”现象，为避免此现象，实际生产中，当原水 Fe(II) 过高时，应避免滤速的突然提升。因为 Mn(II) 的氧化去除只能发生在 Fe(II) 的充分氧化之后，所以锰氧化去除开始的位置向滤层深处发生了 20 cm 位移，直到滤层 70 cm 左右才开始大量去除。当滤速由 2.0 m·h<sup>-1</sup> 变为 4.5 m·h<sup>-1</sup> (EBCT = 21.3 min) 时，锰氧化去除所需滤层厚度增加了 30 cm，直到承托层方可达标，此时，锰成为了滤速提升的限制条件，与 2.2 节的研究结论一致。因为锰在生物滤池内的去除

遵循零级反应规律<sup>[28,29]</sup>, 所以滤速越大, EBCT 越小, 锰的去除量也越少, 为了实现锰达标去除, 可以通过增大滤层高度, 以此来增大 EBCT, 所以, 滤速越大, 锰去除所需的滤层也就越厚. 滤速增加, 导致水流紊动性增强, 生物对氨氮的网捕能力下降, 如图

7 所示, 当滤速由  $2.0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  增加至  $6.0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  时, 氨氮去除位置由滤层  $40 \text{ cm}$  处延伸至了  $85 \text{ cm}$  处. 由于锰的高效氧化去除区间内氨氮浓度增大, MnOB 活性受到不同程度抑制, 锰的去除速率随着滤速增大而有所降低.

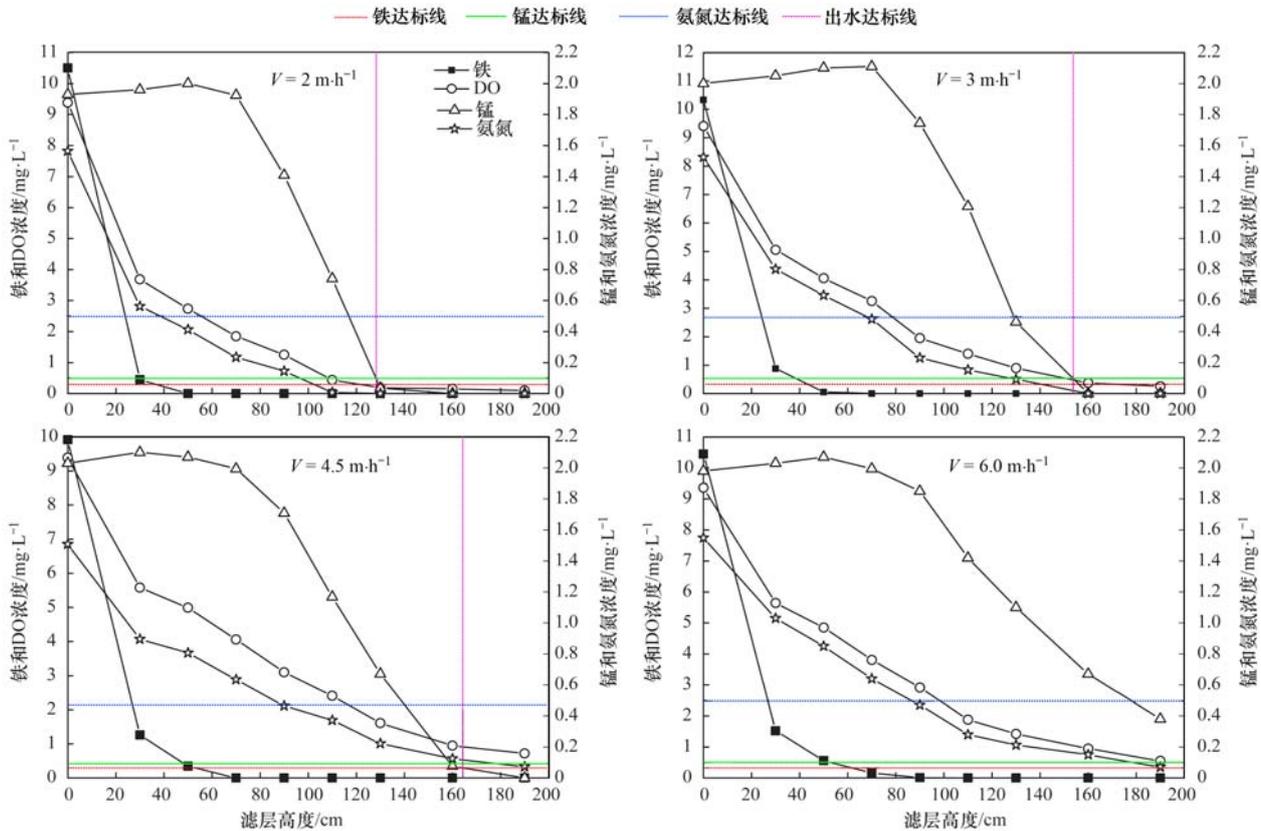


图7 不同滤速条件下锰和氨氮沿去除情况

Fig. 7 Variation of manganese and ammonia nitrogen in the filter column with different filtration speeds

### 3 结论

(1) 低温 ( $5 \sim 6^\circ\text{C}$ ) 条件下可实现高铁锰氨氮 [TFe  $9.0 \sim 12.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Fe(II)  $6.5 \sim 8.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、Mn(II)  $1.9 \sim 2.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$   $1.4 \sim 1.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ] 地下水生物同池净化并稳定运行. 启动周期长短受培养温度和原水水质影响较大.

(2) 低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化工艺启动应采取低速 ( $1.0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ )、弱反冲洗强度 [ $7 \sim 8 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m}^2)^{-1}$ ] 和短反冲洗历时 ( $3 \sim 4 \text{ min}$ ) 等调控措施, 以实现 MnOB 和硝化菌快速富集.

(3) 滤速  $\leq 6.0 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  时, 滤速越大, 锰的极限去除量越低; 氨氮的极限去除量主要受 DO 影响. 低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化稳定运行极限滤速是  $4.5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ , 该滤速下滤池反冲洗强度宜为  $10 \sim 12 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m}^2)^{-1}$ , 反冲洗历时宜为  $4 \sim 5 \text{ min}$ , 反

冲洗周期宜为  $32 \text{ h}$ .

(4) DO 充足的条件下, 工艺净化滤层厚度随锰和氨氮浓度增加、滤速增大而增厚. 增加滤层厚度, 利于提高铁锰氨的去除率. Fe(II) 深入滤层会还原 Mn(IV) 氧化物, 出现“锰溶出”现象; 高浓度氨氮深入滤层会抑制 MnOB 活性, 降低除锰效率, 因此, 实践中应避免滤速大幅提升.

(5) 铁的氧化去除区间不受进水铁锰和氨氮浓度变化影响. 在 DO 充足的条件下, 铁和氨氮的氧化去除可同步进行, 氧化去除高效区间重叠. 锰的氧化去除滞后于铁和氨氮, 锰的高效去除区间与铁和氨氮的高效去除区间存在明显分级.

#### 参考文献:

- [1] Li D, Zhang J, Wang H T, et al. Operational performance of biological treatment plant for iron and manganese removal[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2005, 54 (1): 15-24.
- [2] Mouchet P. From conventional to biological removal of iron and

- manganese in France [J]. Journal (American Water Works Association), 1992, **84**(4): 158-167.
- [3] Tekerlekopoulou A G, Pavlou S, Vayenas D V. Removal of ammonium, iron and manganese from potable water in biofiltration units: a review[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2013, **88**(5): 751-773.
- [4] 蔡言安. 含铁锰氨氮地下水生物净化试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [5] 李冬, 曾辉平. 高铁高锰地下水生物净化技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [6] 李冬. 生物除铁除锰理论与工程应用技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
- [7] Fish J T. Groundwater water treatment for iron and manganese reduction and fish rearing studies applied to the design of the Ruth Burnett Sport Fish Hatchery, Fairbanks, Alaska [J]. Aquacultural Engineering, 2009, **41**(2): 97-108.
- [8] Katsoyiannis I A, Zouboulis A I. Biological treatment of Mn(II) and Fe(II) containing groundwater: kinetic considerations and product characterization[J]. Water Research, 2004, **38**(7): 1922-1932.
- [9] Vries D, Bertelkamp C, Kegel F S, *et al.* Iron and manganese removal: recent advances in modelling treatment efficiency by rapid sand filtration[J]. Water Research, 2017, **109**: 35-45.
- [10] Pacini V A, Ingallinella A M, Sanguinetti G. Removal of iron and manganese using biological roughing up flow filtration technology[J]. Water Research, 2005, **39**(18): 4463-4475.
- [11] Tekerlekopoulou A G, Vayenas D V. Ammonia, iron and manganese removal from potable water using trickling filters[J]. Desalination, 2007, **210**(1-3): 225-235.
- [12] 曾辉平. 含高浓度铁锰及氨氮的地下水生物净化效能与工程应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Zeng H P. Biological purification of iron, manganese and ammonia with high concentration in groundwater and engineering application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [13] Isaka K, Sumino T, Tsuneda S. High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2007, **103**(5): 486-490.
- [14] Isaka K, Date Y, Kimura Y, *et al.* Nitrogen removal Performance using anaerobic ammonium oxidation at low temperatures[J]. FEMS Microbiology Letters, 2008, **282**(1): 32-38.
- [15] 刘建广, 张晓健, 王占生. 温度对生物炭滤池处理高氨氮原水硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(2): 233-236.
- Liu J G, Zhang X J, Wang Z S. Influence of temperature on treating nitrification of high ammonia nitrogen source water in biological carbon filter[J]. China Environmental Science, 2004, **24**(2): 233-236.
- [16] 李冬, 路健, 梁雨雯, 等. 低温生物除铁除锰工艺快速启动与滤速的探求[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 82-86.
- Li D, Lu J, Liang Y W, *et al.* Quick start-up and filter speed searching of biological iron and manganese removal process[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 82-86.
- [17] Hoyland V W, Knocke W R, Falkinham J O, *et al.* Effect of drinking water treatment process parameters on biological removal of manganese from surface water[J]. Water Research, 2014, **66**: 31-39.
- [18] Andersson A, Laurent P, Kihn A, *et al.* Impact of temperature on nitrification in biological activated carbon (BAC) filters used for drinking water treatment [J]. Water Research, 2001, **35**(12): 2923-2934.
- [19] Mann A T, Mendoza-Espinosa L, Stephenson T. Performance of floating and sunken media biological aerated filters under unsteady state conditions[J]. Water Research, 1999, **33**(4): 1108-1113.
- [20] Fdz-Polanco F, Méndez E, Urueña M A, *et al.* Spatial distribution of heterotrophs and nitrifiers in a submerged biofilter for nitrification [J]. Water Research, 2000, **34**(16): 4081-4089.
- [21] Michalakos G D, Nieva J M, Vayenas D V, *et al.* Removal of iron from potable water using a trickling filter [J]. Water Research, 1997, **31**(5): 991-996.
- [22] 张杰, 杨宏, 李冬, 等. 生物滤层中  $Fe^{2+}$  的作用及对除锰的影响[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(9): 14-16.
- Zhang J, Yang H, Li D, *et al.* The function of  $Fe^{2+}$  and its effect on manganese removal in biofilter bed[J]. China Water & Wastewater, 2001, **17**(9): 14-16.
- [23] Cai Y A, Li D, Liang Y W, *et al.* Effective start-up biofiltration method for Fe, Mn, and ammonia removal and bacterial community analysis [J]. Bioresource Technology, 2015, **176**: 149-155.
- [24] 程庆锋, 李冬, 李相昆, 等. 高铁锰氨氮地下水生物净化滤池的快速启动[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, **45**(8): 23-27.
- Cheng Q F, Li D, Li X K, *et al.* Rapid start-up of biological purifying filter of groundwater containing high concentration of iron and manganese associated ammonia nitrogen [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, **45**(8): 23-27.
- [25] 程庆锋, 李冬, 李相昆, 等. 净化高铁锰伴生氨氮地下水的生物滤池快速启动[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(7): 41-44.
- Cheng Q F, Li D, Li X K, *et al.* Rapid start-up of biofilter purifying groundwater containing high concentrations of iron, manganese and ammonia nitrogen [J]. China Water & Wastewater, 2013, **29**(7): 41-44.
- [26] 唐玉兰, 和娟娟, 武卫斌, 等. 曝气生物滤池同步除铁锰和氨氮[J]. 化工学报, 2011, **62**(3): 792-796.
- Tang Y L, He J J, Wu W B, *et al.* Simultaneous removal of iron, manganese and ammonia in biological aerated filter [J]. CIESC Journal, 2011, **62**(3): 792-796.
- [27] 蔡言安, 李冬, 曾辉平, 等. 生物滤池净化含铁锰高氨氮地下水试验研究 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(8): 1993-1997.
- Cai Y A, Li D, Zeng H P, *et al.* Removal of iron, manganese and high ammonia from groundwater by biofilter [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(8): 1993-1997.
- [28] 薛罡, 赵洪宾. 地下水中生物除锰的最佳运行条件及动力学 [J]. 中国给水排水, 2003, **19**(Z1): 85-87.
- Xue G, Zhao H B. Optimal operational conditions and dynamics for biological manganese removal from ground water [J]. China Water & Wastewater, 2003, **19**(Z1): 85-87.
- [29] Jia M L, Li W Z, Xu H Y, *et al.* An integrated air-POM syngas/dimethyl ether process from natural gas [J]. Applied Catalysis A: General, 2002, **233**(1-2): 7-12.
- [30] Gouzinis A, Kosmidis N, Vayenas D V, *et al.* Removal of Mn

and simultaneous removal of  $\text{NH}_3$ , Fe and Mn from potable water using a trickling filter[J]. *Water Research*, 1998, **32**(8): 2442-2450.

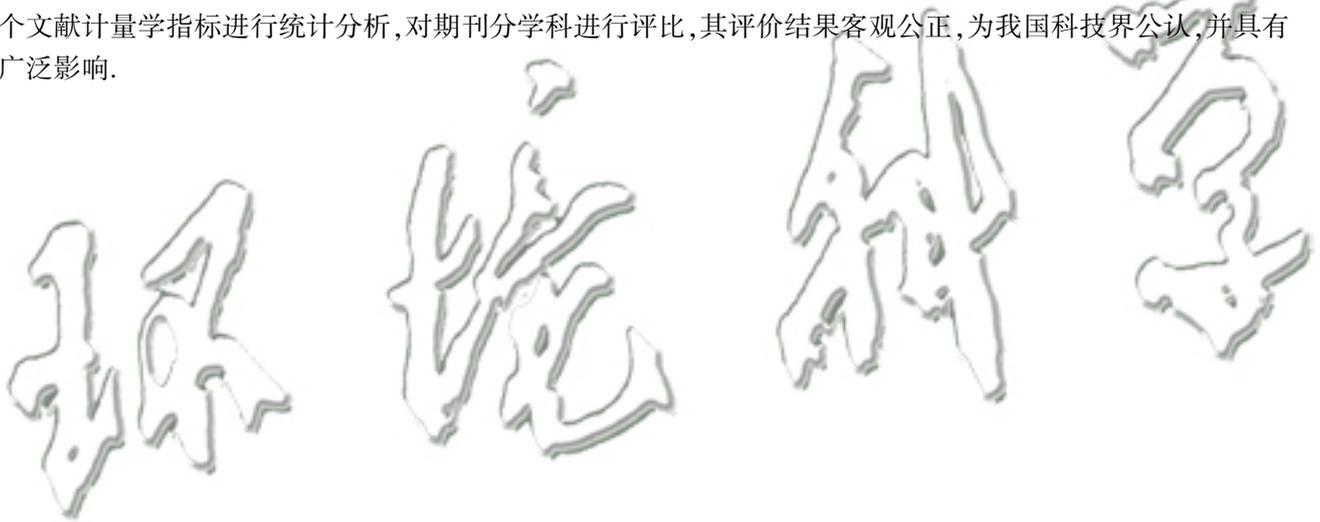
- [31] 曾辉平, 李冬, 高源涛, 等. 高铁高锰高氨氮地下水的两级净化研究[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(11): 142-144.  
Zeng H P, Li D, Gao Y T, *et al.* Two-stage purification of groundwater containing high concentration of iron, manganese and ammonia nitrogen[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, **26**(11): 142-144.

- [32] 曾辉平, 李冬, 高源涛, 等. 生物除铁、除锰滤层中铁、锰的氧化还原关系[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(9): 86-88.  
Zeng H P, Li D, Gao Y T, *et al.* Redox relationship between Fe and Mn in biological filter layer for iron and manganese removal[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, **26**(9): 86-88.
- [33] 禹丽娥. 地下水生物除铁效果及其动力学研究[J]. *供水技术*, 2009, **3**(3): 19-21.  
Yu L E. Efficiency and kinetics of iron removal by biofilter in groundwater[J]. *Water Technology*, 2009, **3**(3): 19-21.

---

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2017年10月31日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续16次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



## CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM <sub>2.5</sub> in Jingjinji Region, 2015 .....	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks .....	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM <sub>2.5</sub> Fine Particulates Based on Multi-source Data .....	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM <sub>2.5</sub> in East China .....	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing .....	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Heze .....	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> in Selected Cities in Liaoning Province .....	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin .....	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM <sub>2.5</sub> in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming .....	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 .....	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus .....	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) and Oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai .....	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China .....	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO <sub>2</sub> Emissions from the Xin'anjiang Reservoir .....	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir .....	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin .....	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain .....	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model .....	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing .....	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen .....	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems .....	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter .....	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water .....	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate .....	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature .....	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite .....	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater .....	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater .....	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process .....	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an .....	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX .....	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms .....	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization .....	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor .....	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR .....	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO <sub>2</sub> Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor .....	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta .....	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers .....	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir .....	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai .....	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City .....	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area .....	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai .....	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants .....	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice .....	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield .....	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N <sub>2</sub> O Emission in the North China Plain .....	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain .....	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from Rivers .....	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)